

圧力溶解を考慮した連成モデルへの Dual Porosity 理論実装と 岩盤の長期透水性評価

緒方 奨* 安原英明** 岸田潔***

A Sample of Manuscript of Submitted Paper to Journal of the Society of Materials Science, Japan

by

Sho Ogata*, Hideaki Yasuhara**, Kiyoshi Kishida***,

We improved our coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) simulator by adopting the dual porosity model to predict the long-term permeability change of the fractured rocks. The model evaluates influence of the geochemical reaction on the evolution of the permeability in fractured rock. Pressure solution that may occur both at grain contacts and the contacting asperities within fractures was incorporated in the model. By using the developed THMC numerical model, long-term prediction of rock permeability under simulated subsurface environments near the radioactive waste repository was conducted. As a result of analysis, the permeability decreased by two orders of magnitude smaller than the initial value due to the pressure solution contacting asperities within fractures in the EDZ area. When carrying out radioactive waste disposal, the pressure solution within the fractures may have the effect on minimizing the increasing of the permeability in EDZ area.

Key words:

HLW repository, fracture permeability, THMC coupling, Pressure solution, Dual porosity

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分システムの長期安全性を評価する上で、重要な検討事項となる深地層下における地下水の挙動を把握するためには、天然バリアである廃棄体周辺岩盤の水理学特性の長期挙動予測が必要である。周辺岩盤を含むニアフィールド環境では、ガラス固化体からの放熱、地下水の流入や対流による物質輸送、空洞掘削に伴う岩盤内の応力環境変化、岩石鉱物の空隙水への溶解・沈殿反応等が相互に影響し合う場が形成される^{1), 2)}。これらの熱・水・応力・化学に関する各現象の相互作用が周辺岩盤の水理学特性変化をもたらすことから、周辺岩盤の水理学特性の長期挙動の予測には、熱・水・応力・化学に関する各現象を統合的に考慮した連成数値解析が必須である。上記の各現象の内、周辺岩盤の水理学特性の長期変化を予測する上で特に重要となるのが、地化学現象（鉱物の溶解・沈殿）である。これまでに、多くの熱（Thermal）・水（Hydro）・応力（Mechanical）・化学（Chemical）連成解析モデル（以下、THMC 連成解析モデル）が開発されてきたが³⁾⁻⁷⁾、地化学現象による周辺岩盤の水理学特性変化を詳細に評価した事例はほとんど存在しない。多くの場合、周辺岩盤で生じる地化学現象の内、岩石内自由表面における鉱物の溶解・沈殿現象（自由表面溶解・沈殿）⁸⁾は考慮されているが、岩石内の不連続面及び粒子接触部での鉱物溶解現象である圧力溶解現象は考慮されていない。この岩

石内の不連続面及び粒子接触部で生じる圧力溶解現象は、共に温度と応力に依存する鉱物溶解現象であり、対象岩盤の水理学特性を長期的に変化させることが確認されている⁹⁾⁻¹³⁾。これらをふまえ、筆者らはこれまでに岩石内自由表面における鉱物溶解・沈殿現象と共に岩石内粒子接触部における圧力溶解現象を新たに考慮した THMC 連成解析モデル¹⁴⁾を開発している。しかし、このモデルでは岩石内粒子接触部で生じる圧力溶解現象は考慮可能であるが、岩石内不連続面接触部で生じる圧力溶解現象は考慮出来ない。既往研究から、不連続面接触部で生じる圧力溶解現象によって岩盤の透水性が数百時間程度で1オーダー以上低下した事例が報告されており¹⁵⁾⁻¹⁷⁾、不連続面接触部で生じる圧力溶解現象は岩盤の水理学特性変化に支配的影響を及ぼすことが予想される。

そこで、本研究では粒子接触部と共に不連続面接触部での圧力溶解を考慮可能な THMC 連成解析モデルを新たに開発し、周辺岩盤の水理学特性の長期挙動予測を行うとともに、粒子接触部及び不連続面接触部における圧力溶解現象が周辺岩盤の水理学特性変化に及ぼす影響を精査する。

2 解析モデル

1・1 モデル概要

本研究で構築する THMC 連成解析モデルは、周辺岩盤を含むニアフィールド環境で生じる T-H-M-C 連成ブ

† 原稿受理 平成 年 月 日 Received

©2011 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂C1-2-338
Department of Urban management, Kyoto University., Kyoto-shi Saikyoku, Kyoto university katsuraC1-2-338.

** 愛媛大学大学院理工学研究科・生産環境工学専攻 〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番
Department of Civil engineering, Ehime University., Ehime prefecture Matsuyama-shi, Bunkiyotyo-3.

***京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂C1-2-335
Department of Urban management, Kyoto University., . Kyoto-shi Saikyoku, Kyoto university katsuraC1-2-335..

プロセス（周辺岩盤におけるガラス固化体からの放熱や地下水の流入や対流による物質輸送、岩盤内の応力環境、岩石鉱物の空隙水への溶解反応等の熱・水・応力・化学に関する複数の各現象が相互に作用し合うプロセス）を記述する連成モデルである。本モデルでは、解析対象を天然バリアである多孔質岩盤に設定しており、人工バリア内の物理・化学現象は解析対象外としている。本モデルで考慮する熱（T）－水（H）－応力（M）－化学（C）間の各相互作用を示したのが Fig.1 である。地化学現象については、自由表面溶解・沈殿および圧力溶解の2種類を考慮しており、以下それぞれ、CおよびCMと記述する。本モデルは、筆者らが以前構築した連成解析モデル¹⁴⁾では考慮されていなかった水－応力（H⇌M）と熱－応力（T⇌M）の相互作用を考慮可能であり、T-H-M-Cそれぞれの全ての作用が相互に影響し合う複雑な連成関係を記述可能なモデルである。また、前述した連成解析モデル¹⁴⁾に不連続面接触部での圧力溶解現象を新たに組み込みことにより、岩石実部だけでなく不連続面での地化学現象による岩盤の透水性変化を記述可能であるという点が従来の THMC 連成解析モデルと異なる点である。

2・2 支配方程式

THMC 連成解析モデルの解析フローを Fig.2 に示す。本解析では、地下水流動、熱輸送、応力変形、化学種輸送、地化学反応を考慮し、流動方程式（ダルシー則、水の質量保存式）、熱エネルギー方程式、線形弾性則、多孔質弾性体理論、化学種輸送方程式、鉱物反応式といった複数の支配方程式を順に計算し、各変数を受け渡していくことにより THMC 連成挙動を記述する。

(a) 地下水流動

本解析は、計算対象として弾性体の挙動を示す水飽和状態の多孔質岩盤を想定している。したがって、水－応力の連成計算には水圧変化に伴う有効応力変化や変形に伴う水の流入及び水圧変化を考慮可能な多孔質弾性体理論を用いる。また、想定する多孔質岩盤には、亀裂から構成される不連続面、粒子と空隙から構成される岩石実部の異なる空隙系を有する二つの領域が存在すると仮定する。このような媒体中の水の流れを記述するため、異なる空隙系間での水の移動等を考慮可能な dual porosity¹⁸⁾モデルを採用する。この dual porosity モデルでは、亀裂部・岩石実部それぞれの領域割合を定め、異なる空隙率を与えることにより、Fig.3 に示すように一つの計算要素内で、仮想的に異なる空隙系を持つ不連続面と岩石実部を考慮し、両空隙系における水の流れを記述することができる。本解析では、この dual porosity モデルを多孔質弾性体理論に適用した以下の流動方程式を用いる²⁾。式（1）～（3）はそれぞれ岩石内亀裂部、岩石実部におけるダルシー則と水の質量保存式である。 dual porosity 理論では、水は岩石実部より透水性の高い亀裂部を介してのみ移動するという想定であり、空隙率の大きい岩石実部は貯留系空隙としての働きを持つ。式(4)、(5)は亀裂部と岩石実部の間を移動する水の量を表している。

$$\rho_w S_f \frac{\partial P_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}_f) + \rho_w \alpha_f \frac{\partial e_{vol}}{\partial t} = f_w \quad (1)$$

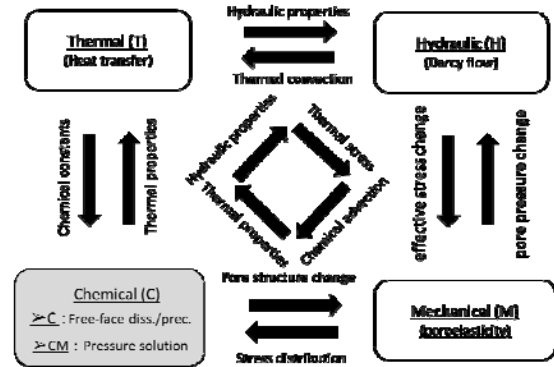


Fig.1 THMC interactions considered in the developed model.

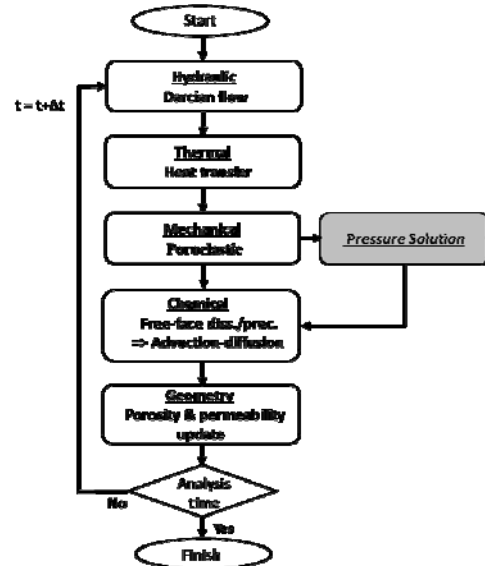


Fig.2 Calculation flow.

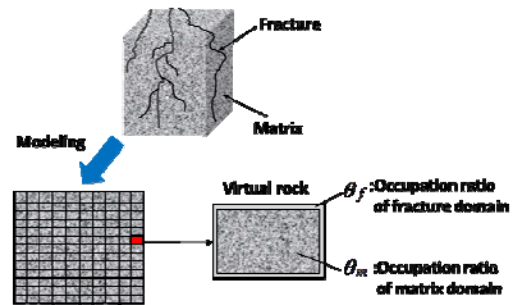


Fig.3 Concept of dual porosity theory.

$$\mathbf{u}_f = -\frac{k_f}{\mu} (\nabla P_f + \rho_w g \nabla D) \quad (2)$$

$$\rho_w S_m \frac{\partial P_m}{\partial t} + \rho_w \alpha_m \frac{\partial e_{vol}}{\partial t} = f_w \quad (3)$$

$$f_w = \Gamma_w(P_f - P_m) \quad (4)$$

$$\Gamma_w = \frac{-\alpha k_m}{\mu}(P_f - P_m) \quad (5)$$

ここで、 $k_{f,m}$: 透過率 (不連続面, 岩石実部) [m^2], ρ_w : 水の密度 [kg m^{-3}], μ : 水の粘性係数 [Pa s], $P_{f,m}$: 透水差圧 (不連続面, 岩石実部) [Pa], $S_{m,f}$: 水の貯留率 (不連続面, 岩石実部) [Pa^{-1}], $\alpha_{f,m}$: Biot willis 係数 (不連続面, 岩石実部) [-], g : 重力加速度 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], D : 位置水頭 [m], f_w : 不連続面と岩石実部間で移動する水の質量 [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$], Γ_w : カップリング係数 [$\text{kg Pa}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$], α : 岩石実部の形状係数 [m^2]である. 不連続面と岩石実部を合わせた多孔質媒体全体としての流速は, それぞれの領域の値に多孔質岩盤中に存在する不連続面・実部それぞれの領域割合を乗じて求められる.

$$u = \theta_f u_f + \theta_m u_m \quad (6)$$

u : 多孔質岩盤内の空隙水の流速 [m s^{-1}], θ_f : 多孔質岩盤内に不連続面が占める割合 [-], θ_m : 多孔質岩盤内に岩石実部が占める割合 [-],

(b) 応力解析

本解析における応力解析では, 平面ひずみ状態を仮定し, 多孔質弾性理論に際づき, 応力つり合い式と水圧と熱応力の変化を考慮した線形弾性則により岩盤内応力を算出する^[9].

$$-\nabla \cdot \sigma = F_v \quad (7)$$

$$\sigma = E : (\varepsilon - \varepsilon_T) + \alpha_B P I \quad (8)$$

$$\alpha_B P = \alpha_B (\theta_f P_f + \theta_m P_m) \quad (9)$$

ここで、 F_v : 物体力 [N m^{-3}], σ : 応力テンソル [N m^{-2}], E : 弾性係数行列, ε : ひずみテンソル [-], ε_T : 熱ひずみテンソル [-], α_B : 多孔質岩盤の Biot willis 係数 [-]である.

(c) 熱エネルギー方程式

岩盤内の温度分布を算出するための熱エネルギー方程式を下記に示す^[9].

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_{p,w} u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \nabla T) + Q \quad (10)$$

ここで、 T : 温度 [K], $(\rho C_p)_{eq}$: 平衡熱容量 [$\text{J K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$], $C_{p,w}$: 水の定圧比熱容量 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], k_{eq} : 平衡熱伝導率 [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]である.

(d) 化学種輸送

岩盤内の空隙水中の化学物質濃度変化を記述する化学種輸送方程式を次式に示す^[9]. 本解析では化学物質の空隙水中における移流と拡散のみを考慮し, 化学物質の岩盤への吸着作用と空隙水中での分散現象については考慮していない.

$$\frac{\partial (c_i \phi)}{\partial t} + u \cdot \nabla c_i = \nabla \cdot (D_{i,e} \nabla c_i) + r_i \quad (11)$$

$$D_{i,e} = \phi \tau D_{i,b} \quad (12)$$

$$r_i = \sum_j c_j v_i R_j \quad (13)$$

ここで、 c_i : 化学種 i の空隙水中の濃度 [mol m^{-3}], $D_{i,e}$: 化学種 i の実効拡散係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], r_i : 鉱物溶解・沈殿による化学種 i の濃度変化 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$], τ : 液相屈曲率 [-], $D_{i,b}$: 空隙水中の拡散係数 (等方性) [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], v_i : 化学種 i の化学両論係数 [-], R_j : 多孔質岩盤中の鉱物 j の反応速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$]である.

(e) 鉱物反応速度式

本解析で想定する多孔質岩盤は, 亀裂から構成される不連続面と粒子と空隙から構成される岩石実部の二つの領域を持つ. 岩盤内では, 不連続面と岩石内実部の二つの領域において, 異なる形式で, 空隙水と岩石構成鉱物の間で鉱物の溶解・沈殿反応が生じる. 本モデルでは, 不連続面・岩石実部の各領域それぞれにおいて生じる鉱物反応 (自由表面溶解沈殿現象と圧力溶解現象) を考慮する. 以上をふまえ, dual porosity 理論を適用すると, 多孔質岩盤における鉱物 j の反応速度式は不連続面及び岩石実部の二つの領域における鉱物反応速度と各領域の存在割合を考慮した次式で表される.

$$R_j = \theta_f R_{f,j} + \theta_m R_{m,j} \quad (24)$$

ここでは、 $R_{f,j}$: 不連続面における鉱物反応速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $R_{m,j}$: 岩石実部における圧力溶解速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$]である. また, 岩石実部と不連続面それぞれにおける鉱物反応速度は, 各領域における自由表面溶解速度と圧力溶解速度を考慮した次式で表される.

$$R_{m,j} = R_{m,j}^{FF} + R_{m,j}^{PS} \quad (25)$$

$$R_{f,j} = R_{f,j}^{FF} + R_{f,j}^{PS} \quad (26)$$

ここで、 $R_{m,j}^{FF}$: 岩石実部における自由表面溶解・沈殿反応速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $R_{m,j}^{PS}$: 粒子接触部における圧力溶解速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$]である. $R_{f,j}^{FF}$: 不連続面内の自由表面溶解・沈殿速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $R_{f,j}^{PS}$: 不連続面接触部における圧力溶解速度 [$\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$]である.

(f) 岩石実部における鉱物反応速度式

岩石実部空隙内で生じる自由表面溶解・沈殿反応は Lasaga^[9]の溶解速度式により次のように表される.

$$R_{m,j}^{FF} = f_r k_{+,j} \cdot A_g \cdot (a_{H^+})^q \cdot (1 - Q_j / K_{eq,j}) \quad (27)$$

ここで、 $k_{+,j}$: 鉱物の溶解速度定数 [$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], f_r : ラフネスファクター [-], A_g : 幾何学的に求めた単位溶液当たりの鉱物表面積 [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$], a_{H^+} : H^+ の活量 [-], q : 反応次数 [-], Q_j : 鉱物のイオン活量積 [-], $K_{eq,j}$: 鉱物の平衡定数 [-]である. また, 岩石実部内の粒子接触部で生じる圧力溶解速度は, 粒子接触部と自由表面での化学ポテンシャルの差を評価することにより次式で定義される^{[13],[14]}.

$$R_{m,j}^{PS} = \frac{3 f_r R_{m,c} V_{m,j} k_{+,j}}{4 R T d} \left(\frac{\sigma_m}{(12/\pi)(1 - \phi_m) - 2} - \sigma_c \right) \quad (28)$$

ここで、 V_m : モル体積 [$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$], σ_c : 臨界応力 [Pa]

d : 粒子直径[m], $R_{m,c}$: 粒子接触割合 [-], σ_m : 平均有効応力[MPa], ϕ_m : 岩石実部領域の空隙率[-]である。

(f) 岩石実部における透水性変化

本解析では、岩石実部領域の空隙率変化については、力学的な圧縮変形による影響と鉱物溶解・沈殿反応等の化学作用による影響を考慮しており、任意の時間 t における空隙率は次式で定義される^[14]。

$$\phi(t) = \phi_i + \phi^m(t) + \phi^{FF}(t) + \phi^{PS}(t) \quad (29)$$

$$\phi^m(t) = (1 - \phi) \varepsilon_v \quad (30)$$

$$\phi^{FF}(t) = \int \dot{\phi}^{FF}(t) dt = \int V_{m,j} \cdot R_{m,j}^{FF} dt \quad (31)$$

$$\phi^{PS}(t) = \int \dot{\phi}^{PS}(t) dt = \int -\dot{\varepsilon}_m^{PS} \cdot (1 - \phi) dt \quad (32)$$

ここで、 $\phi(t)$: 任意時間 t における空隙率 [-], ϕ_i : 初期空隙率 [-], $\phi^m(t)$: 任意時間 t における力学的変形による空隙率変化 [-], ε_v : 体積ひずみ[-], $\phi^{FF}(t)$: 任意時間 t までの自由表面溶解・沈殿による空隙率総変化量 [-], $\phi^{PS}(t)$: 任意時間 t までの圧力溶解による空隙率総変化量 [-]である。岩石実部における透過率変化については、自由表面溶解・沈殿、圧力溶解反応による空隙率変化に伴う透水性変化を定量評価するため、Kozeny-Carman 式^[20]を用いた次式で透過率を評価する。

$$k_r = \frac{k_m(t)}{k_i} = \frac{(1 - \phi_i)^2}{(1 - \phi(t))^2} \left(\frac{\phi(t)}{\phi_i} \right)^3 \quad (33)$$

ここで、 k_r : 相対透過率 [-], $k(t)$: 任意時間 t における透過率 [m²], k_i : 初期透過率 [m²]である。

(f) 岩石不連続面における鉱物反応速度式

岩石不連続面における鉱物反応の速度式を導く上で、まず、Fig.4のような一つの不連続面接触と空隙から構成される任意の不連続面領域を代表要素と仮定する。この代表要素における自由表面溶解・沈殿速度による単位時間当たりの鉱物溶解量は、Lasaga^[8]の式より、次式のように表される。

$$\dot{M}_f^{FF} = f_r \chi_i k_+ \cdot A_{rea} \cdot (a_{H^+})^n \cdot (1 - Q / K_{eq}) \quad (34)$$

$$A_{rea} = 2 \cdot (1 - R_{f,c}) \cdot A_f^l \quad (35)$$

ここで、 $\dot{M}_f^{FF}$: 代表要素内の自由表面溶解・沈殿による単位時間当たりの鉱物 j の溶解・沈殿量 [mol s⁻¹], A_{rea} : 代表要素内自由表面における反応表面積 [m²], $R_{f,c}$: 不連続面接触率[-], A_f^l : 代表要素における不連続面総面積 [m²]である。また、代表要素の空隙体積 V_f は、式 (46) で表される。

$$V_f = (1 - R_{f,c}) \cdot A_f^l \cdot b \quad (36)$$

ここで、 V_f : 代表要素の空隙体積 [m³]である。 b : 代表要素の平均幾何学的開口幅[m]である。この式 (36) と式 (34) を用いて、不連続面における自由表面溶解・沈殿速度が算出される。

$$R_{f,j}^{FF} = 2 \cdot f_r k_{+,j} \cdot (a_{H^+})^n \cdot (1 - Q_j / K_{eq,j}) / b \quad (37)$$

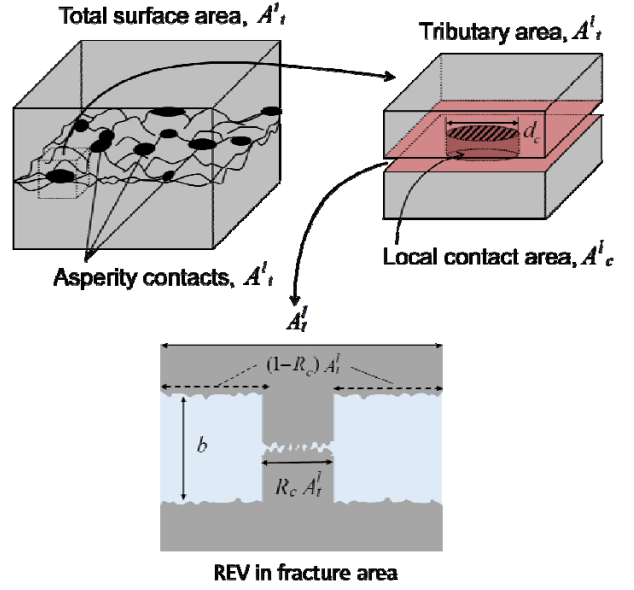


Fig. 4 Geometrical model that includes representative element in rock fracture area^[16].

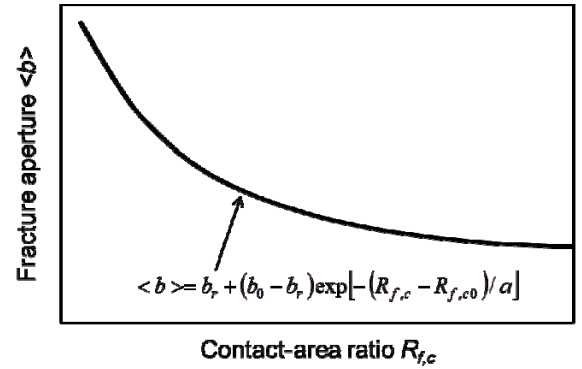


Fig. 5 Relation between aperture and contact area ratio^[16].

岩盤不連続面内において、圧力溶解は Fig. 4 に示するような不連続面内アスペリティ接触部（不連続面接触部）で生じるといわれている。この不連続面接触部における圧力溶解現象の速度式の導出過程について記す。圧力溶解によるひずみ変化率と平均開口幅変化率は、不連続面接触部と自由表面での化学ポテンシャルの差を評価することにより次式で定義される^[13]。

$$\dot{\varepsilon}_f^{PS} = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{3V_m^2 k_+}{RTb} \cdot \left(\frac{\sigma_{VM}}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (38)$$

$$= \frac{1}{b} \cdot \frac{\Delta b}{\Delta t} = \frac{3V_m^2 k_+}{RTb} \cdot \left(\frac{\sigma_{VM}}{R_{f,c}} - \sigma_c \right)$$

$$\frac{\Delta b}{\Delta t} = \frac{\dot{V}_f^{PS}}{A_{f,c}} = \frac{3V_m^2 k_+}{RT} \cdot \left(\frac{\sigma_{VM}}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (39)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}_f^{PS}$ ：不連続面接触部における圧力溶解によるひずみ変化率 [s⁻¹]、 $\dot{V}_f^{PS}$ ：一つの不連続面接触部での圧力溶解による体積変化率 [m³s⁻¹]、 $A_{f,c}$ ：不連続面接触面積 [m²]である。これらから、Fig.4 で示された代表要素における圧力溶解現に伴う体積変化率は、式(39)を用いて次式で求められる。

$$\dot{V}_f^{PS} = \frac{\Delta b \cdot A_{f,c}}{\Delta t} = \frac{3V_m^2 k_+ A_{f,c}}{RT} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (40)$$

これをモル体積で除し、ラフネスファクターを乗じると代表要素内で単位時間当たりに溶解する鉱物 j の物質質量 [mol s⁻¹]が求められる。

$$\dot{M}_f^{PS} = \frac{3f_r V_m k_+ A_{f,c}}{RT} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (41)$$

これを代表要素の空隙体積 V_f で除した値が不連続面における圧力溶解速度式 R_f^{PS} [mol m⁻³ s⁻¹]である。

$$R_{f,j}^{PS} = \frac{3f_r V_{m,j} k_{+,j}}{RTb(1-R_{f,c})} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (42)$$

不連続面接触部において、圧力溶解現象が進行すると、Fig.5 の様に、不連続面開口幅が減少してゆき、それに伴い不連続面接触率が增大していく。Yasuhara and Elsworth¹⁷⁾は、単一不連続面の上下ラフネス情報をレーザー変位計により計測し、バーチャル不連続面を作成することにより、不連続面の開口幅とその接触率の関係を以下の様な式で表している。上下ラフネス情報をレーザー変位計により計測し、バーチャル不連続面を作成することにより、不連続面の開口幅とその接触率の関係を以下の様な式で表している。

$$b = b_r + (b_0 - b_r) \exp(-(R_{f,c} - R_{f,c0})/a) \quad (43)$$

b ：平均開口幅[m]、 b_r ：残留開口幅[m]、 b_0 ：初期開口幅[m]、 $R_{f,c}$ ：不連続面接触率[-]、 $R_{f,c0}$ ：初期不連続面接触率[-]、 a ：定数[-]である。本モデルでは、不連続面の開口幅とその接触率の関係式として、式(43)を用いている。式(47)では、Fig.5 が示す様に、接触率増加に対し、開口幅は指数関数的な減少挙動を見せる。

f) 岩石不連続面における透水性変化

本解析では、不連続面の開口幅変化について、応力腐食や粒子破壊等の応力作用による影響は考慮せず、鉱物溶解・沈殿反応等の化学作用による影響のみを評価する。したがって、自由表面溶解・沈殿と圧力溶解による影響を考慮し、任意の時間 t の不連続面開口幅は次式で定義される。

$$b(t) = b_i + b^{FF}(t) + b^{PS}(t) \quad (44)$$

$$b^{FF}(t) = \int \dot{b}^{FF} dt = \int 2f_r (1-R_{f,c}) k_{+,j} (1-Q_j/K_{eq,j}) dt \quad (45)$$

$$b^{PS}(t) = \int \dot{b}^{PS}(t) dt = -\frac{3f_r k_{+,j} V_{m,j}^2 (1-R_{f,c})}{RT} \left(\frac{\sigma_m}{R_{f,c}} - \sigma_c \right) \quad (46)$$

ここで、 $b(t)$ ：任意時間 t における不連続面開口幅 [m]、 b_i ：初期開口幅 [m]、 $b^{FF}(t)$ ：任意時間 t までの自由表面溶解・沈殿による開口幅総変化量 [m]、 $b^{PS}(t)$ ：任意

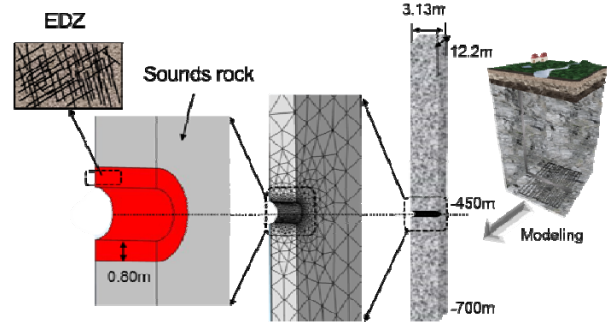


Fig.6 Calculation domain.

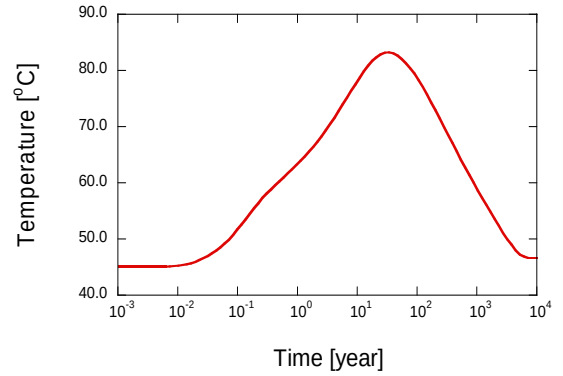


Fig.7 Temperature change with time used as the boundary condition²¹⁾.

時間 t までの圧力溶解による開口幅総変化量 [m]である。不連続面における透過率変化に関しては、不連続面において三乗則が成立すると仮定し、以下の式により評価される。

$$k_f(t) = \frac{b(t)^2}{12} \quad (47)$$

3 解析事例

本研究で構築した THMC 連成解析モデルを用いて放射性廃棄物地層処分システムにおける廃棄体周辺岩盤の水理学特性変化挙動の予測解析を実施する。天然バリアのモデル化においては、我が国の我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—第2次取りまとめ²¹⁾—（以下、第2次取りまとめと記す）に示されている横置き方式を採用した。解析領域 (Fig.6) には、鈴木ら²²⁾を参照し、地表から深度 700m までの岩盤を対象とし、深度 450m 地点に廃棄体を設置するものとした。坑道直径は、2.22m に設定し、坑道を中心として、坑道離間距離の 1/2 (12.2m) とガラス固化体ピッチ (3.13m) を水平方向に想定した 3D モデル (Fig.6) としている。解析対象岩盤は石英 (Quartz) のみで構成される珪質堆積岩 (初期空隙率 40%、乾燥密度 1700 kg/m³) と仮定している²³⁾。地下岩盤の動水勾配は 1/1000²⁴⁾、地温勾配は 5°C/100m とし、地表面は 15°C に設定している。坑道掘削影響領域 (EDZ) に関しては、第2次取りまとめ²¹⁾で示された掘削影響モデルより評価している。第2次取

りまとめ²¹⁾では、EDZ として坑道壁面より約 1m の範囲でマイクロクラックが発生し、透過率が健岩部より、2 オーダー程度高くなることが報告されている^{22),25)}。そのため本解析では、Fig.6 に示すように坑道壁面から 0.8m の範囲を EDZ、他の領域を健岩部 (Intact rock) とし、健岩部の透過率 $1 \times 10^{-15} \text{m}^2$ に対して、EDZ の初期透過率を 2 オーダー高い $1 \times 10^{-13} \text{m}^2$ に設定している。前述した様に、本モデルでは、不連続面と岩石実部の二つの領域を有する多孔質媒体を取り扱う dual porosity モデルを採用しており、無数の不連続面が存在する EDZ の計算にのみ dual porosity モデルを適用する。EDZ 中の 0.1% を不連続面領域とし、残り 99.9% の領域を岩石実部と設定した。健岩部では、不連続面が極めて少ないと仮定し、岩石実部のみから構成される通常の single porosity モデルを適用する。また、本モデルの解析期間は 1000 年間としている。次に、廃棄体からの放熱については、第 2 次取りまとめにおいて実施された温度解析から得られた緩衝材外側の温度変化 (Fig.7) をモデルの坑道壁面の温度として与えている²¹⁾。また、熱移動に関しては、坑道に垂直な側面に対象条件を設定し、この側面と坑道壁面を除く他の全側面に熱流出条件を設定している。化学種輸送については、坑道に垂直な側面に対象条件を設定し、この側面を除く他の全側面に化学種濃度の流出条件を設定している。岩盤内応力に関しては、空洞掘削に伴う応力再配分を考慮した自重解析を実施した。土圧係数 K_0 は、地表面から深度 200m までの領域では 0.5 に 200m 以深では 1.0 に設定した²⁶⁾。解析に用いたパラメータの一覧を Table.1 に示す。

4 解析結果

(a) 長期透水性変化

空洞掘削後 1000 年までの空洞周辺の平均有効応力分布を Fig.8 に示す。本解析において平均有効応力は、圧力溶解の駆動力となる重要なパラメータである。図より、空洞壁面及び空洞境界周辺の平均有効応力が他の領域と比べ大きいことが確認できる。また、空洞掘削後、経時的な応力変化はみられず、本解析で想定した様な地質環境条件下では、熱応力や水圧変化等有効力変化に及ぼす影響は小さいと言える。

本研究では、岩盤の水理学特性変化について、圧力溶解を考慮する場合 (PS condition: 地化学現象について自由表面溶解・沈殿と共に、圧力溶解を考慮する場合) と圧力溶解を考慮しない場合 (No PS condition: 自由表面溶解・沈殿のみを考慮する場合) で解析結果を比較する。圧力溶解を考慮する場合は、EDZ では岩石実部と不連続面内における圧力溶解を考慮し、健岩部では岩石実部内の圧力溶解のみを考慮する。圧力溶解を考慮しない場合と考慮した場合の空洞周辺の透過率の経時変化を Fig.9 に示す。ここでは、透過率を対数表記した値 ($\log_{10}k$) を用いて透水性変化を評価した。図より、圧力溶解を考慮しない場合は、透過率は時系列で変化せず一定であることが確認できる。このことから、自由表面溶解・沈殿現象のみが、岩盤の水理学特性に与える影響は極めて小さいと言える。一方、圧力溶解を考慮した場合は、特に EDZ で時間の経過とともに透過率が顕著に減少していることが確認できる。初期状態から廃棄体設置後 100 年

Table.1 Parameters used in calculation²²⁾⁻²⁴⁾

	EDZ	Intact Rock
Young's modulus [GPa]	2.5	2.5
Poisson ratio [-]	0.3	0.3
Initial permeability [m^2]	1.0×10^{-13}	1.0×10^{-15}
Initial porosity [-]	0.4	0.4
Initial fracture aperture [μm]	11	—
Matrix occupation ratio [%]	99.9	—
Fracture occupation ratio [%]	0.01	—

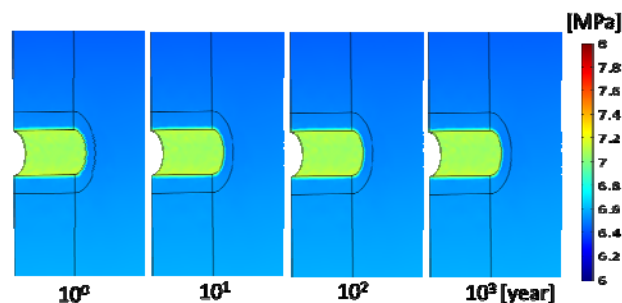


Fig.8 Evolution of mean effective stress after cavity excavation

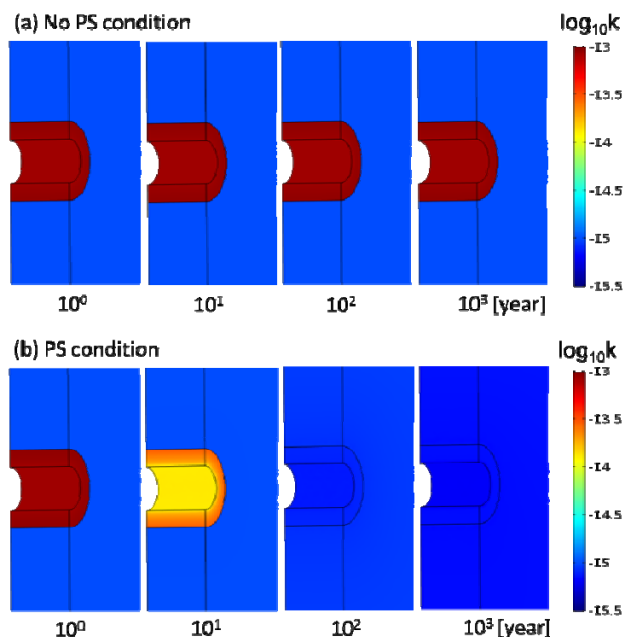


Fig.9 Evolution of permeability with time under (a) the no PS and (b) the PS condition

の時点では、EDZ の透過率は、既に他の健岩部と同等の値まで低下していることが分かる。この透水性低下が EDZ で生じた圧力溶解現象に起因するものであることは明らかである。また、EDZ でのみ不連続面における圧力溶解を考慮していることから、前述した EDZ 内における透過率の低下は、岩石実部と不連続面で生じる圧力溶解のうち、不連続面における圧力溶解による影響によるものであると考えられる。

次に、周辺岩盤の透水性変化をより詳細に把握するため、Fig.10 に示すように観測点を設定し、透過率の経時

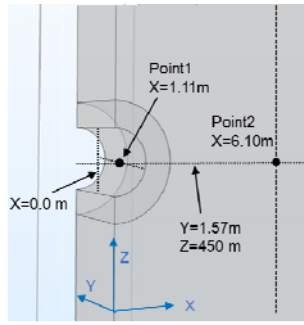


Fig.10 Measurement point

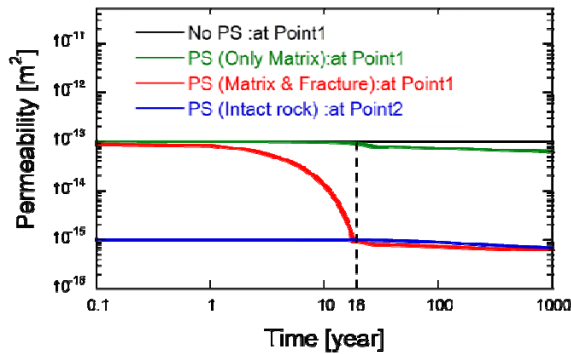


Fig.11 The permeability changes with time at measurement points in No PS and various PS conditions

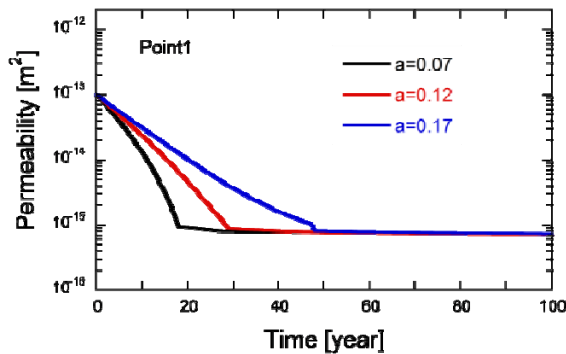


Fig.12 The permeability changes with time at measurement Points1 with different values for $a = 0.07, 0.12, 0.17$ used in Eq.(43).

変化を評価した。観測点はそれぞれ空洞壁面上に Point1 を、健全岩部内の空洞境界から 6.10m 離れた地点に Point2 を設置した。また、岩石実部内（粒子接触部）における圧力溶解と不連続面内（不連続面接触部）における圧力溶解のそれぞれの影響を精査するため、EDZ での岩石実部と不連続面における圧力溶解の有無で透水性変化を比較した。各空隙系（岩石実部、不連続面）での圧力溶解の有無で、観測点（Point1）における透過率の経時変化を比較したものを Fig.11 に示す。EDZ で岩石実部と共に不連続面における圧力溶解を考慮した場合（図中、PS (Matrix & Fracture)）は、初期状態から約 18 年で約 2 オーダー程度透過率が低下し、Point2 で観測された健全岩部の透過率（図中、PS (Intact rock)）と同等の値まで低

下していることがわかる。また、18 年以降は、透過率の低下速度が大きく減少し、解析開始後 1000 年までに緩やかな勾配で、18 年時点の透過率の値から約 40 % ($4.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$) 程度低下していることが確認できる。一方、岩石実部における圧力溶解のみを考慮した場合（図中、PS (Only Matrix)）は、解析開始から 1000 年間で、初期状態から約 40 % ($4.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) 程度低下しているだけである。これらから、EDZ における廃棄体設置から 18 年間の約 2 オーダー程度の透過率低下は岩石不連続面接触部における圧力溶解に起因しており、その後の非常に緩やかな勾配の透水性低下挙動は岩石実部内の粒子接触部における圧力溶解に起因していることが確認できる。つまり、以上の結果から EDZ での透水性変化には不連続面接触部における圧力溶解が支配的影響を及ぼすことが予想できる。

(b) パラメトリックスタディ

本節では、不連続面接触部における圧力溶解速度に関連するパラメータである式 (47) 中の定数 a の値を変化させ、周辺岩盤の透水性変化に与える影響を検討する。パラメータ a の値は、単一不連続面を有する岩石供試体等のラフネス情報を計測し、その情報をもとに Fig.5 の様な不連続面の開口幅とその接触率の関係式を近似することで求めることが出来る。本研究では、上記の様な計測を実施しておらず、パラメータ a は未知数であるので、今回は、Yasuhara and Elsworth^[15] で用いられていた a の値 ($a = 0.07$) を参照し、この $a = 0.07$ とその値を更に増加させた $a = 0.12, 0.17$ の 3 パターンで検討を行う。EDZ で粒子接触部と不連続面接触部における圧力溶解を考慮した条件下で、上記の 3 パターンでパラメータ a を変化した場合の観測点 Point1 における透過率の経時変化を Fig.12 に示す。図から 3 パターンとも、前述の通り、不連続面接触部における圧力溶解の影響によって初期状態から約 2 オーダー程度透過率が低下した後、定常に近い状態に至る傾向を示している。3 パターンとも最終的な収束値はほぼ等しいが、パラメータ a の値が大きくなるほど、定常状態に至るまでの透過率の減少速度が低下する傾向が明らかである。 $a = 0.07$ と $a = 0.17$ の場合を比較すると、定常状態に至るまでにかかる時間が $a = 0.17$ の方が約 30 年程度も遅いということが確認できる。これらの結果から、不連続面接触部での圧力溶解による透過率の減少挙動は、不連続面開口幅と接触率の関係性に強く依存することが明らかであり、不連続性岩盤の透水性変化を精緻に予測するには、パラメータ a の値の設定が重要 となることが判明した。

5 おわりに

本研究では、粒子接触部と共に不連続面接触部における圧力溶解現象を考慮することで岩石実部と不連続面の両領域における地化学作用による岩盤の透水性変化を評価可能な新たな THMC 連成解析モデルを開発した。また、開発した解析モデルを用いて、放射性廃棄物地層処分近傍の地下岩盤の透水特性変化の長期挙動予測解析を行った。本研究で考慮する圧力溶解の内、岩石実部と不連続面における二つの圧力溶解現象の考慮の有無についても解析結果を比較し、透水性変化への影響度を評価した。解析結果から、岩盤不連続面における圧力溶解の影響により、EDZ において掘削後約 20 年以内に透水性が他の健全岩部と同等の値まで低下する傾向が確認された。つまり、EDZ のような岩石実部と不連続面の異なる空隙系を持つ領域では、岩石実部より不連続面における圧力溶解現象の方が岩盤の透水性変化に支配的影響を及ぼすことが判明した。

不連続面における開口幅と不連続面接触率の関係を左右する式 (47) 中の α 値の条件を変化させ、周辺岩盤の透水性経時変化に及ぼす影響を精査した。その結果、周辺岩盤の透過率の減少挙動は、パラメータ α 値によって大きく左右されていることが判明した。不連続面における透水性低下挙動は、不連続面開口幅と接触率の関係性に強く依存することが明らかとなり、実現象を精緻に予測するには、これらの値を適切に設定することが重要であることが確認された。

参 考 文 献

- 1) Tsang, Y., "Effects of coupled processes on a proposed high-level radioactive waste repository at Yucca Mountain", Nevada. GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA MEMOIRS, Vol. 209: pp.363-393 (2012).
- 2) Rutqvist, J., Wu, Y-S, Tsang, C-F, G. Bodvasson., "A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 39, pp.429-442 (2002).
- 3) Nasir, O., Fall, M., Evgin, E., "A simulator for modeling of porosity and permeability changes in near field sedimentary host rocks for nuclear waste under climate changes influences", Tunnel and Underground Space Technology, Vol. 42, pp.122-135 (2014).
- 4) Fall, M., Nasir, O., and Nguyen, T. S., "A coupled hydro-mechanical model for simulation of gas migration in host sedimentary rocks for waste repositories", *Engineering Geology*, Vol.176, pp. 24-44 (2014).
- 5) Zhang, R., Yin, X., Winterfeld, PH, Wu, Y-S, "A fully coupled thermal-hydrological-chemical model for CO₂ geological sequestration", Journal of Natural Gas Science and engineering, Vol. 28, pp. 280-304 (2016).
- 6) Liu, Y., Ma, L., Ke, D., Cao, S., Xie, J., Zhao, X., Chen, L., Zhang, P., "Design and validation of the THMC China-Mock-Up test on buffer material for HLW disposal", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.6, pp. 119-125 (2014).
- 7) Danko, G., Bahrami, D., "A New T-H-M-C Model Development for Discrete-Fracture EGS studies", Geothermal Resources Council Transactions, Vol.36: 383-392(2012). "
- 8) Lasaga, A.C., "Chemical Kinetics of Water-Rock Interactions", Journal of Geophysical Research, Vol. 89, pp.4009-4025(1984).
- 9) Liu, Y., Ma, L., Ke, D., Cao, S., Xie, J., Zhao, X., Chen, L., Zhang, P., "Design and validation of the THMC China-Mock-Up test on buffer material for HLW disposal", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 6, pp. 119-125 (2014).
- 10) Elias, B. P., and Hajash, A., Change in quartz solubility and porosity change due to effective stress: An experimental investigation of pressure solution, *Geology*, Vol. 20, pp. 451-454 (1992).
- 11) Polak, A., Elsworth, D., Yasuhara, H., Grade, A., Halleck, P., "Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids", Journal of Geophysical Research, Lett., Vol. 30, 2020, doi:10.1029/2003GL017575(2003).
- 12) Polak, A., Elsworth, D., Liu, J., Grader, A.S., "Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture with net dissolution", *Water Resources Research*, Vol.40, W03502, doi:10.1029/2003WR002717 (2004).
- 13) Yasuhara, H., Elsworth, D. and Polak, A., "A mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B11, 2530, doi:10.1029/2003JB002536, 2003.
- 14) Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ogata, S., Cheon, D.S., "Coupled thermal-hydro-mechanical-chemical modeling by incorporating pressure solution for estimating the evolution of rock permeability, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, Vol.86, pp.104-114(2016).
- 15) Yasuhara, H., Elsworth, D., Polak, A., Evolution of permeability in a natural fracture: the significant role of pressure solution. *Journal of Geophysical Research*, 109 (B3) (2004).
- 16) Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Lee, D.S., Nakashima, S., Kishida, K., "Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model", *Applied Geochemistry*, Vol.26, pp.2074-2088 (2011).
- 17) Yasuhara, H., Elsworth, D., "A numerical model simulating reactive transport and evolution of fracture permeability", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.30: pp.1039-1062 (2006).
- 18) Barenblatt, G.I., Zheltov, I.P. and Kochina, I.N., "Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks", *Journal of Applied Mathematical Mechanics*, Vol.24, No.5, pp.1286-1303(1960).
- 19) COMSOL2014 : COMSOL MULTIPHYSICS. Version 5.0, Available from www.comsol.com.
- 20) Bear, J., "Dynamics of Fluids in Porous Media", p.166, Dover Publications, Inc., 1972.
- 21) Japan Nuclear Cycle Development Institute, "Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, Supporting Report 2 Repository Design and Engineering Technology, H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan", JNC TN1410 2000-003, IV-139-IV-160 (2000).
- 22) Suzuki, H., Nakama, S., Fujita, T., Imai, H., Sazarshi, M., "A long-term THMC assessment on the geochemical behavior of the bentonite buffer", *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Environment* Vol.19, pp.39-50 (2012).
- 23) Miyazawa, D., Sanada, H., Kiyama, T., Sugita, Y., Ishijima, Y., "Poroelectric coefficients for siliceous rocks distributed in the Horonobe area, Hokkaido, Japan", *J. MMIJ*, Vol.127, pp.132-138(2011).
- 24) Kamei, G., Honda, A., Mihara, M., Oda, C., Murakami, H., Masuda, K., Yamaguchi, K., Matsuda, S., Ichige, S., Takahashi, K., Meguro, Y., Yamaguchi, H., Sakakibara, T., Sasaki, T., "Research and development for treatment and disposal technologies of TRU waste JFY 2007 annual report", *JAEA-research* Vol. 082, pp.1-84.J (2008).
- 25) Minato K (ed.), "JAEA R&D review 2013" ISSN 2188-1456.
- 26) E. Hoek, P. K. Kaiser and W. F. Bawden, *SUPPORT UNDERGROUND EXCAVATION IN HARD ROCK*, pp.1-235 (1993).